

지식 베이스를 이용한 로봇틱 조립 셀의
모델링과 운영관리를 위한 프레임워크

김대원, 고명삼, 이범희
서울대학교, 제어계측공학과, 로봇틱스 및 지능시스템 연구실

A Framework for Modelling and Operation Management of
Robotic Assembly Cells via Knowledge Base

Dae Won Kim, Myoung Sam Ko, Bum Hee Lee
Robotics and Intelligent Systems Lab.
Dept. of Control and Instrumentation Engineering
Seoul National University

Abstract

We propose a framework for modelling and operation management of robotic assembly cells via knowledge base. In the framework, each component of the cell is considered as a state variable, the relations among the state variables are stored in state transition maps(STMs) and then transformed into the form of knowledge. The assembly job tree(AJT) which includes the precedence relations and the constraints for assembly tasks is also described. Finally, an algorithm is presented to manage the cell operation.

1. 서론

생산 시스템에 있어서 생산성이나 효율의 향상을 위한 노력 중의 하나인 FA (Factory Automation) 기술은 컴퓨터 산업, 산업 로봇 기술 그리고 인공 지능 분야 등의 도움으로 놀랄만한 발전을 거듭하고 있으며, 공장 자동화 기술의 기본 개념인 FMS (Flexible Manufacturing System) 에 대한 연구도 여러 방면에서 활발하게 진행되고 있다. 지금까지, FMS의 모델링과 분석 그리고 성능 평가를 위해서 광범위 하기도, 실제적인 관심과 함께 몇가지의 방법들이 제시된 바 있다.

최근 점차 활발히 연구되고 있는 QN (Queueing Network) 모델[2],[20] 은 시스템의 입출력 동작에 의한 분석만이 가능하므로 시스템 내부 구성요소의 동작 파악이 곤란하며, 강한 수학적 가정이 필요하다는 단점이 있다. 그러나, FMS내에서의 시스템 역학, 불확실성 등을 고려하고 있고, 매우 효율적인 계산 알고리즘의 이용이 가능하며[6], 성능 평가를 위한

좋은 모델을 제공한다고 볼 수 있다.

Boolean 모델[4]의 경우에는 사건의 발생과 연관되어 상태 변화가 일어나는 결정론적인 (deterministic) 시스템을 고려하므로 표현이 간단하고, 이해가 쉬우나, 모델의 상태가 Boolean 변수의 벡터로 표현되므로 자원의 비대 문제가 발생 가능하고, 성립된 모델에 대한 분석이 이루어지지 않았다.

PN (Petri Net) 모델[5],[6]은 도식법(graphic method)에 의한 모델로서 FMS의 모델링과 분석을 위한 완전한 틀 구조 (framework)를 제공한다. 그러나, 이 모델은 생동감 (liveness) 과 동일 데이터 구조 (concurrent data structure)에 대한 검증 방법이 부족하며[8], 시스템 역학으로부터 제어 메카니즘을 분리해 내기가 어려운 단점이 있다.

한편, 1980년대 들어서서 인공지능의 기술이 실재적인 여러 분야에 적용되기에 이르렀고, 특히 FMS에서는 부품의 경로 결정이나 기계 선택 등과 같이 의사결정 (decision making) 이 필요한 부분에 부분적으로 응용되고 있다[9],[13].

요즘 FMS에서의 산업용 로봇의 응용은 점차 다양해 지고 있다. 특히 과거에는 취급 (handling)이나 불-운전 (tool-operating)에 불과했던 로봇의 응용 분야가 복잡한 조립 작업으로 까지 확대되어 가고 있으며, 미래의 최대 응용 분야는 조립 작업이 될 전망이다[12].

이에 따라, FMS의 기본 단위의 하나로 볼 수 있는 로봇틱 조립셀 (robotic assembly cell)을 대상으로

로 하며, 셀의 동작에 따라 셀 내부 로봇들의 제어 입력을 계산해 내는 모델의 필요성을 느끼게 되었다.

본 논문에서는 셀 내의 각 구성 요소들을 상태변수로 잡고, 상태변수 사이의 관계를 지식 베이스화하여 주어진 제약 조건과 가정에 따라 지정된 셀의 동작을 만족시키기 위한 로봇의 제어 입력을 계산해 내는 모델을 제안한다.

2. 문제의 설정 및 가정

2.1 문제의 설정

미분 방정식에 의하여 표현되지 않고, 이산 사건(discrete event)의 복잡, 미묘한 상호관계에 의해서만이 표현가능한, 인간이 만든 동적 시스템을 DEDS (discrete event dynamical systems)라 부른다[21]. 그 예로는 EMS나, 통신 망 구조, 교통 시스템 등이 있고, 여기서 사건이라 함은 임의의 지점에서, 임의의 시간에 시스템 요소들 내에서 발생하는 불연속적인 변화의 발생을 의미한다. 그리고, 이 시스템에서의 상태전이(state transition)는 단지 비동기이산순간(asynchronous discrete instants)에만 발생한다.

그러나, 오랜 연구 역사를 지닌 CVDS(continuous variable dynamical systems)와 달리 DEDS에 대한 좋은 해석적 모델이나 기술은 미비한 형편이다[20], [21].

본 논문에서는 과거 각 스테이션(station)에서 대기중인 부품의 갯수나, 각 스테이션의 준비상태(readiness status) 또는 작업 일람표 등으로 고려되던 상태변수 개념에서 탈피하여 로봇들을 포함하는 셀 내의 각 구성요소들의 상태를 상태변수로 잡는다. 이때 책정된 상태변수들은 서로 미묘하게 연관되어 있기때문에, 그들 사이의 관계와 셀 내부의 조건들과 연부되어 있는 상태들의 상태전이에 대한 문제를 푸는 것은 매우 중요한 문제이다.

먼저, 비록 구체적인 함수 자체를 밝혀내지는 못할지라도 각 상태변수의 상태전이 관계를 해석적 함수의 형태로 표현하고,이로부터 각 상태변수 마다 상

태전이의 관계를 도식적으로 묘사해 주는 STM(state transition map)을 작성한다. 이때 STM에서 각 상태변수의 상태는 노우드(node)로 표현되고, 두 상태 사이의 관계조건은 링크(link)로 표현된다. 그러므로 작성된 도식적 STM으로부터 모든 노우드와 링크의 관계를 인공지능 기법을 이용하여 지식 베이스로 변환하고, 저장시킬 수 있다.

또 한편으로는 조립 작업을 위한 사전 정보로서 주어지는 선행관계(precedence relations)와 조립 작업을 위한 제약조건들의 내용을 포함하는 AJT(assembly job tree)를 작성하는데, 이는 정해진 형식에 따라 지식의 형태로 저장, 운용된다.

이상의 두가지 지식 정보와, 셀 내부의 상태를 나타내 주는 BC(environment condition)를 통하여 이산사건의 발생에 따른 각 상태변수들의 상태천이를 결정할 수 있고, 로봇의 경로선택(route selection) 문제를 포함하는 셀 운영관리(operation management) 문제를 해결할 수 있다.

예를 들어, 만일 부품도착과 같은 외부원인에 의한 사건(exogenous event)이 발생한다면 셀 내부에서는 상태천이가 발생하며, 그 결과 내부원인에 의한 사건(endogenous event)이 발생할 수도 있다. 이는 셀 내부의 상태를 나타내 주는 BC에 의해서 좌우되며, 이러한 BC와 지식 정보의 형태로 저장, 활용되고 있는 STM과 AJT를 통하여 셀 전체의 운영관리가 가능하다.

2.2 가정

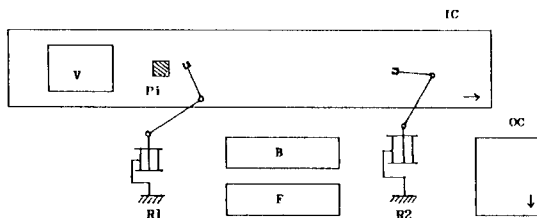
하나의 간단한 DEDS의 예이며, 동시에 FMS의 기본 단위로서 하나의 로봇틱 조립 셀을 대상으로 잡는다. 대상 셀은 다양한 조립 기능을 갖춘 몇 대의 로봇, 입력 및 출력 컨베이어 시스템, 조립순서를 기다리기 위한 버퍼링 대기행렬(buffering queue), 그리고 조립작업을 위한 작업대(fixture) 등으로 구성된다. 그리고 대상 시스템을 결정론적 시스템으로 가정하고, 상태 및 입출력 집합은 유한하며, 셀 내의 로봇들은 충돌-자유 동작(collision-free motion)을

수행한다고 가정한다.

한편, 사건은 외부원인에 의한 사건과 내부 원인에 의한 사건으로 분류되며, 다시 내부원인에 의한 사건은 ASTE (automatic state transition event) 와 CSTE (conditional state transition event) 로 분류할 수 있다. 여기서 외부 원인에 의한 사건이란 외부 입력에 의해서 발생하는 사건이고, 내부 원인에 의한 사건중 ASTE는 사건이 발생하면 자동적으로 상태전이 가 발생하는 사건이며, CSTE는 정해진 일정주기 마다 셀의 현재 상태를 알려주는 EC를 관찰하고 정해진 조건을 만족하기 전까지는 상태전이가 유보되는 사건으로 정의한다. EC란 정해진 일정주기 마다 셀의 지정된 장소에서 얻어내는 정보로서, EC를 종합적으로 관찰함에 의해서 셀의 현재 상태를 알 수 있다. 또한, CSTE의 발생 여부를 판단하기 위해서는 EC 값을 일정 주기 마다 관찰하고, 비교, 판단하여야 하는데 이때의 주기를 GST (global sampling time)로 정의한다.

3. STM (State Transition Map)을 위한 상태 변수의 모델링

하나의 간단한 로봇틱 조립 셀의 예로서, 입출력 컨베이어 시스템, 로봇트 비전 시스템, 버퍼링 대기행렬, 그리고 작업대를 갖추고 있는 두 대의 로봇트 시스템을 생각해 본다. 그림 1은 이에 대한 하드웨어적인 형상이다.



V : the robot vision system
 Pi : part to be assembled
 R1, R2 : two robots, capabilities of which are different
 B : the buffering queue
 F : the fixture where the products are being assembled
 IC : the input conveyor
 OC : the output conveyor

그림 1. 두 대의 로봇트 시스템의 하드웨어적인 형상

위의 예에서, 상태변수로서 두 개의 로봇트 상태, 부품 상태, 버퍼링 대기행렬 상태, 입력 컨베이어 상태 등 다섯 가지를 잡을 수 있다. 즉, 고려된 로봇틱 조립 셀은 시간 t 에서 5중요소 (Rt^1, Rt^2, Pt, Bt, Ct) 에 의해 묘사될 수 있다.

여기서,

- Rt^1, Rt^2 : 로봇트 상태
- Pt : 부품 상태
- Bt : 버퍼링 대기행렬 상태
- Ct : 입력 컨베이어 상태

또한, 각각의 상태변수는 다음과 같은 해석적 형식으로 표현될 수 있다.

로봇트 상태:

$$Rt_{t+1}^1 = F_1(Rt^1, ut^1, at^1, bt^1) \quad (1)$$

$$Rt_{t+1}^2 = F_2(Rt^2, ut^2, at^2, bt^2) \quad (2)$$

여기서,

$$ut \triangleq \begin{bmatrix} ut^1 \\ ut^2 \end{bmatrix} : \text{시간 } t \text{에서의 결정}$$

$$Rt \triangleq \begin{bmatrix} Rt^1 \\ Rt^2 \end{bmatrix} : \text{로봇트 상태 벡터}$$

$$E[at] : \text{평균 그리핑 사고율}$$

$$E[bt] : \text{평균 조립 사고율}$$

$$at \triangleq \begin{bmatrix} at^1 \\ at^2 \end{bmatrix}, \quad bt \triangleq \begin{bmatrix} bt^1 \\ bt^2 \end{bmatrix}$$

부품 상태:

$$Pt_{t+1} = G(Pt, Rt, ut, at, bt) \quad (3)$$

여기서,

$$Pt = [Pt^1, Pt^2, \dots, Pt^n]$$

: 부품 상태 벡터

n : 셀에 입력된 부품의 갯수

버퍼링 대기행렬 상태:

$$Bt_{t+1} = H(Bt, Rt, ut) \quad (4)$$

여기서,

Bt : 버퍼링 대기행렬 상태

입력 컨베이어 상태:

$$Ct_{t+1} = Q(Ct, Rt, ut, at, ct, dt) \quad (5)$$

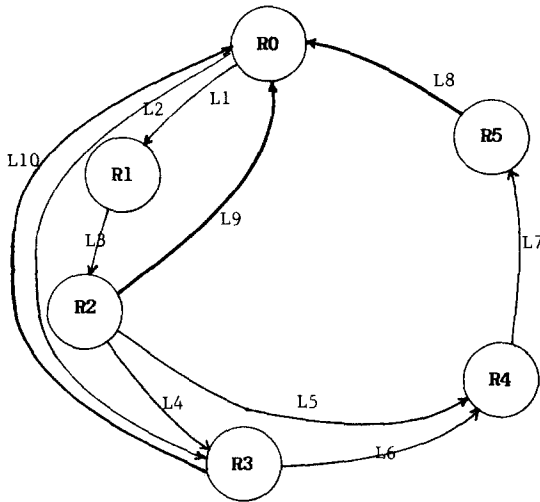
여기서,

Ct : 입력 컨베이어 상태

E[ct] : 평균 인식 사고율

dt : 부품의 도착에 관련된 변수

이로부터, 각 상태변수에 대응하는 STM을 만들어 낼 수 있다. 주어진 예에서 로봇트 1의 경우, 상태변수가 가질 수 있는 모든 경우를 생각해 보고, 각 상태 사이의 전이조건을 찾아내어 그림 2와 같은 로봇트 1의 STM을 구성할 수가 있다.



- R0 : the robot ready state (idle state)
- R1 : the robot gripping-ready state
- R2 : the robot gripping state
- R3 : the robot-in-buffer state
- R4 : the robot-in-fixture state
- R5 : the robot assembling state

그림 2. 주어진 예에서 로봇트 1의 STM

4. 지식 베이스를 이용한 셀의 운영관리

이 장에서는 셀의 운영을 관리하는 방법을 제험적 (heuristic) 접근방법에 의하여 서술한다. 셀 운영을 위해서 설계된 시스템은 STM 과 AJT 관리를 위해 KBM (knowledge base manager), EC 의 관리를 위해 CEM (cell environment manager), 우발적인 사고 (failure) 발생 처리를 위해 FH (failure handler), 그리고 위의 각 부분과 셀 전체의 운영을 관리하는 중앙 관리자인 COM (cell operation manager)으로 구성된다.

4.1 지식 베이스 관리자 (KBM)

지식 베이스 관리자의 기능은 셀 운영 관리자 (COM)로 부터의 정보에 의해서 STM 과 AJT에 저장된 지식 베이스를 이용하여 상태변수의 값과 조립 작업의 진행 상황을 매 GST 마다 최신화시키는 일이다. 다시 말해, 지식 베이스 관리자는 STM 과 AJT 를 관리하며, 셀 운영 관리자와의 정보 교환을 수행한다. 그림 3은 KBM의 알고리즘을 설명한다.

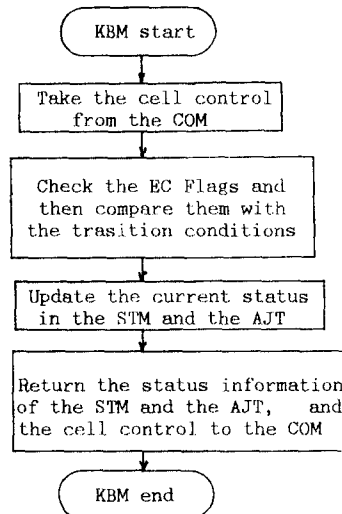


그림 3. KBM 알고리즘 흐름도

(1) STM (State Transition Map)

정의된 상태변수가 가질 수 있는 모든 상태 값을 상태노드 (state node)로 정의하고, EC 의 조건에 따라 한 상태노드로 부터 다른 상태노드로의 전이를 상태링크 (state link)로 정의할 때, 하나의 상태링크로 연결된 두 개의 상태노드를 시작 상태노드 (start state node) 및 종결 상태노드 (end state node)로 볼 수 있다. 이 두 개의 상태노드와 이와 연관된 상태링크를 하나의 저장 단위로 하여 지식 베이스의 구조로 변환하고, STM 내의 다른 모든 경우에 대해서도 같은 방법으로 실행하면 도식적 방법에 의해 작성된 STM으로부터 지식의 형태로 저장된 STM을 작성할 수 있다.

(2) AJT (Assembly Job Tree)

조립품의 조립 순서인 선행관계 (precedence relation) 를 알아내고, 그때 필요한 제약조건들을 파악해 내는 일은 FMS의 계획 단계중 시간의 흐름상 초기의 단계에서 실행되는 일이므로 본 논문에서는 주어진 선행관계와 각 부품 조립시의 제약조건들을 지식 베이스에 저장하는 한가지 방법을 제시한다. 조립 순서를 나타내는 선행관계는 순서쌍 (ordered pair) 의 집합으로 구성된 이산관계 (binary relation) 의 집합으로 표현이 가능하다. 그러므로, 한 레코오드의 구성은 위의 선행관계를 나타내는 두 요소와 이 레코오드의 식별번호 (identification number), 다음 레코오드의 식별번호와 조립 제약조건들의 색인 등 다섯가지 요소로 이루어진다. 이는 셀 운영 관리자가 셀의 상태에 따라 진행해야 할 조립 작업이 무엇인가를 파악하고, 의사결정 (decision making) 을 내리는데 편리하며, 각기 다른 조립 작업시 필요한 제약조건들의 변경이 용이하다.

4.2 셀 환경 관리자 (CEM)

셀 환경 관리자의 기능은 EC 를 점검하고, EC 값을 저장하고 있는 EC Flag 를 최신화시키며, 셀 운영 관리자와의 정보 교환을 수행하는 것이다. 그림 4는 CEM의 알고리즘을 설명한다.

4.3 사고 처리자 (FH)

셀이 정상적으로 운영되던 도중 발생가능한 그리핑사고 (gripping failure)나 조립사고 등과 같은 사고 발생시 EC Flag 와 STM 및 AJT 의 내용을 최신화시켜 주고, 로봇은 준비(ready)의 상태로 복귀시킨다. 그러나, FH 알고리즘의 경우 셀의 구성요소나 작업내용에 따라 구체적으로 발생가능한 사고가 달라지게 되므로 일반적인 알고리즘의 수립이 어렵다.

4.4 셀 운영 관리자 (COM)

셀 운영 관리자의 기능은 셀 내의 로봇들이 이동해야 할 경로(route)와 동작의 선택 및 의사결정을 수행하고, 지식 베이스 관리자를 통하여 상태천이와

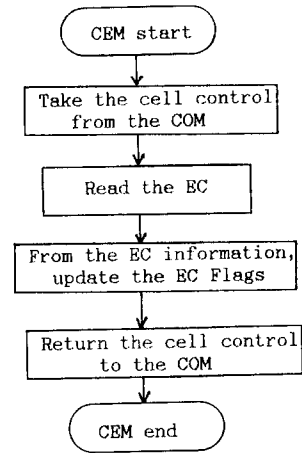


그림 4. CEM 알고리즘 흐름도

조립작업의 진행 상황을 점검하며, 사고 처리자를 통하여 모든 사고를 처리한다. 또한 미리 정해진 성능지표 (performance index) 값에 따라 로봇의 제어 입력을 계산하고, 판단하는 기능도 갖는다. 그림 5는 COM의 알고리즘을 설명하며, 여기서 결정 대기행렬 (decision queue)이란 로봇의 결정된 동작명령을 일시적으로 저장하는 장소를 의미한다.

5. 결 론

이 논문은 로봇틱 조립 셀을 체험적 접근방법으로 모델링하고, 운영 관리하는 하나의 방법론을 제시한다. 셀 모델링의 경우, 각 구성요소를 상태변수로 잡았으며, 상태전이의 관계를 해석적 함수의 형태로 표현하였다. 상태변수 사이의 미묘한 연관관계는 먼저 도식적인 방법에 의한 STM에 의하여 묘사하였고, 이를 지식의 형태로 변환하였다. 셀의 운영은 EC 를 주기적으로 점검하고, STM 정보와 주어지는 AJT정보를 담고 있는 지식 베이스를 통하여 관리된다.

현재까지는 DEDS에 대한 이용가능한 좋은 해석적 모델이 없기 때문에, 이 논문에서는 결정론적인 시각에서 도식적인 방법과 체험적인 방법을 이용하여 문제에 접근하였다.

앞으로 모델의 구조를 좀더 세련화하고, 체계화하는 문제와 정의된 모델을 분석하는 문제에 대하여 더 많은 연구가 필요하리라 생각되며, 이에 대한 검증

문제도 풀어야 할 과제의 하나이다. 특히, 정의된 각 상태변수의 비례감도(sensitivity) 문제는 분석에 있어서 중요한 연구 대상이 되리라 사료된다.

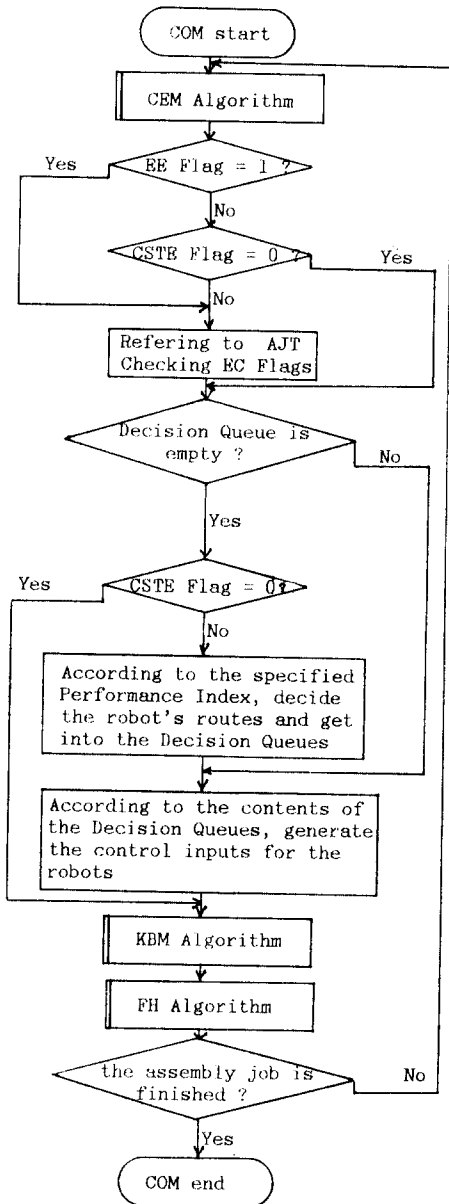


그림 5. COM 알고리즘 흐름도

References

[1] M. Staroswiecki, M. Djeghaba, and M. bayart, "Tasks scheduling by multicriteria optimization in a flexible assembly cell using robot cooperation", Proc. of 15th ISIR, pp 847-854, Tokyo, Japan, 1985.
 [2] David D. Yao and J. A. Buzacott, "Modelling the performance of flexible manufacturing systems", Int. J. Prod. Res., Vol.23, No.5, pp 945-959, 1985.
 [3] Hanan Lechtman and Shimon Y. Nof, "Perfor-

mance time models for robot point operations", Int. J. Prod. Res., Vol.21, No.5, pp 659-673, 1983.
 [4] Robert L. Aveyard, "A Boolean model for a class of discrete event system", IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-4, No.3, May 1974.
 [5] M. Kamath and N. Viswanadham, "Application of Petri net based models in the modelling and analysis of flexible manufacturing systems", Proc. of the 1986 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp 312-317, 1986.
 [6] N. Viswanadham and Y. Narahari, "Coloured Petri net models for automated manufacturing systems", Proc. of the 1987 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp 1985-1990, 1987.
 [7] Carolyn L. Beck and Bruce H. Krogh, "Models for simulation and discrete control of manufacturing systems", Proc. of the 1986 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp 305-310, 1986.
 [8] J. S. Ostroff and W. M. Wonham, "State Machines, Temporal Logic and Control: a Framework for Discrete Event Systems", Proc. of 28th Conf. on Decision and Control, pp 681-686, Dec. 1987.
 [9] David H. Ben-Arieh, Colin L. Moodie, and Chi-Chung Chu, "Control Methodology for FMS", IEEE J. of Robotics and Automation, Vol.4, No.1, pp 53-59, Feb. 1988.
 [10] C. H. Golaszewski and P. J. Ramadge, "Control of discrete event processes with forced events", Proc. of the 26th Conf. on Decision and Control, pp 247-251, Dec. 1987.
 [11] Stanley B. Gershin, "A Hierarchical Framework for Manufacturing System Scheduling; A Two-Machine Example", Proc. of the 26th Conf. on Decision and Control, pp 651-656, Dec. 1987.
 [12] Andrew Kusiak, "Flexible manufacturing systems: a structural approach", Int. J. Prod. Res., Vol.23, No.6, pp 1057-1073, 1985.
 [13] A. Villa, R. Mosca, and G. Murari, "Expert control theory: A key for solving production planning and control problems in flexible manufacturing", Proc. of the 1986 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp 466-471, 1986.
 [14] A. Kusiak and A. Villa, "Architectures of expert systems for scheduling flexible manufacturing systems", Proc. of the 1987 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp 113-117, 1987.
 [15] B. R. Fox and C. Y. Ho, "A relational control mechanism for flexible assembly", Advanced Software in Robotics, pp 43-53, North-Holland, 1984.
 [16] O. Z. Maimon and S. Y. Nof, "Coordination of Robots Sharing Assembly Tasks", Tran. of the ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.107, pp 299-307, Dec. 1985.
 [17] James L. Peterson, Petri Net Theory and the Modeling of Systems, Prentice-Hall, 1981.
 [18] Bernard P. Zeigler, Theory of Modelling and Simulation, John Wiley & Sons, 1976.
 [19] P. H. Winston and B. K. P. Horn, LISP, Addison-Wesley, 1981.
 [20] Y. C. Ho, "Performance Evaluation and Perturbation Analysis of Discrete Event Dynamic Systems", IEEE Trans. on AC, Vol. AC-32, NO.7, pp 563-572, July 1987.
 [21] "Challenges to Control: a collective view", IEEE Trans. on AC, Vol. AC-32, NO.4, April 1987.
 [22] Paul Levi and Thomas Loeffler, "The Use of Assembly Graph for Robot Programming", Language for Sensor-Based Control in Robotics, Springer-Verlag, pp 233-259, 1987.
 [23] K. Rathmill, Robotic Assembly, IFS Ltd, 1985.